

Title	GaAs(111)B上に分子線エピタキシャル成長した MnAs/ -As複合構造の横型スピントロニクス素子応用
Author(s)	Islam, Md. Earul
Citation	
Issue Date	2018-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/15327">http://hdl.handle.net/10119/15327</a>
Rights	
Description	Supervisor: 赤堀 誠志, マテリアルサイエンス研究科 , 博士

氏名	ISLAM, Md. Earul		
学位の種類	博士(マテリアルサイエンス)		
学位記番号	博材第 444 号		
学位授与年月日	平成 30 年 3 月 23 日		
論文題目	Lateral spintronic device application of molecular beam epitaxial grown MnAs/III-As hybrid structures on GaAs(111)B		
論文審査委員	主査	赤堀 誠志	北陸先端科学技術大学院大学 准教授
		小矢野 幹夫	同 教授
		鈴木 寿一	同 教授
		安 東秀	同 准教授
		原 真二郎	北海道大学 准教授

### 論文の内容の要旨

In spintronics electron spin is used as information carrier in addition to its charge. It is already well established metal-based spin-devices practical applications. To use spin degree of freedom into semiconductor spintronic device technology such as in spin field effect transistor (spin-FET), there are three main technological challenges are, firstly, injection of spin polarized carrier from a ferromagnetic (FM) into semiconductor (SC) channel and detection by FM, secondly, SC channel should have strong spin-orbit coupling (SOC) to precess spin during transport through SC channel, and finally, control of the spin precession by gate electric field to modulate spin signal. Therefore, exploring promising FM/SC hybrid structures are important. Here, we synthesized MnAs/III-As hybrid structures on GaAs(111)B as a possible candidate for future spin-FET and investigated the first challenging issue into the hybrid structures. We carried out successful molecular beam epitaxial (MBE) growth of MnAs(~5-200 nm)/GaAs(~0-10 nm)/thick-InAs(~200-1200 nm) /GaAs(111)B hybrid structures at low temperature MnAs epitaxial growth. In reflection high energy electron diffraction (RHEED) study, we see double step lattice transition ~4 nm of InAs from GaAs surface and abrupt lattice transition of GaAs ~3.6 nm from InAs lattice respectively. The origin of these transition is still unclear for such lattice mismatch growth. In  $2\theta$  x-ray diffraction (XRD) measurement of MnAs(~200 nm)/thick-InAs(~1200 nm) /GaAs(111)B, we see single phase epitaxial growth of hexagonal MnAs with cubic InAs and GaAs (only low temperature MnAs growth case). Also, the extracted lattice parameters are consistent with their bulk values which imply that the grown epitaxial layers are strain relaxed. To check deviation of c-axis, we carried out  $\omega$  scanning. From  $\omega$  and  $2\theta$  measurement, we also observed less deviation (InAs ~0.12° and MnAs~0.22°) of c-axis normal to the planes of thicker MnAs(200 nm) and InAs(1200 nm) layers. Hence, the  $2\theta$  and  $\omega$  scanning indicates good epitaxial growth of MnAs and InAs. We also estimated thickness

dependence threading dislocation density from the  $\omega$ - $\theta$  broadening, we found reduction of the dislocation density with increasing grown layer thickness. It means better crystal quality in thicker case. Also comparatively, InAs shows less dislocation density in similar thickness than that of on GaAs(001). Besides, we also confirmed smooth surface and maze-like magnetic structures by atomic force microscopy (AFM) and magnetic force microscopy (MFM). The MnAs  $\sim$ 5-200 nm samples show strong magnetic anisotropy along [-2110] and [01-10] lateral and [0001] out of plane directions by superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometry. It also reveals easy and isotropic magnetization in lateral directions which is similar to MnAs directly on GaAs(111)B. We also see higher MnAs thickness higher saturation magnetization and lower coercive field which seems directly related to the crystal quality. The better the crystal quality the better the magnetic response. It also shows over room temperature ( $\sim$ 300 K) magnetism (estimated Curie temperature  $\sim$ 320-324 K). However, to evaluate contact between MnAs/InAs on GaAs(111)B, we studied transmission line model (TLM) device and found isotropic Ohmic behaviors in lateral [-110] and [11-2] directions of cubic InAs. Specific contact resistance, of MnAs/InAs interface at  $\sim$ 300 K is  $\sim$ ( $10^{-5}$ - $10^{-4}$ )  $\Omega$ -cm<sup>2</sup> which is little higher than typical Ohmic contact. However, over room temperature isotropic magnetic and isotropic electric behaviors in lateral directions gives good flexibility to design lateral spintronic device. We studied trials of lateral spin valve device of MnAs ( $\sim$ 50 nm)/GaAs ( $\sim$ 1, 3)/InAs ( $\sim$ 200 nm)/GaAs(111)B grown samples in lateral spin valve device application. Through the study, we improved device processing and carried out lateral spin valve measurement using AC lock in technique. We successfully confirmed spin injection and detection through simultaneous local spin valve (LSV) and non-local spin valve (NLSV) measurements in lateral spin valve device of 1 nm GaAs barrier insertion sample at 1.5 K. We obtained large spin diffusion length  $\sim$ 10  $\mu$ m and spin injection efficiency  $\sim$ 1.6% which is similar to other FM/narrow gap hybrid structures. However,  $\sim$ 2.0 time enhancement of NLSV signal can also be seen in FM-FM input case than that of FM-NM input case. On the other hand, at 300 K, the extracted spin diffusion length  $\sim$ 2.6  $\mu$ m and spin injection efficiency  $\sim$ 6.3% which is significantly large value in comparison to other FM/narrow gap hybrid structures at 300 K. The enhancement of spin injection efficiency at 300 K is due to better impedance matching between MnAs/InAs rather than at 1.5 K.

In conclusion, we can say that large spin injection efficiency  $\sim$ 6.3 % of the hybrid structure is record value at  $\sim$ 300 K which is very promising for future spin-FET application. Further, higher GaAs thickness dependence investigations are necessary to clarify spin injection efficiency more in details as well as other two challenging issues also have to be investigated before approaching spin-FET applications.

**Keywords:** 1. Molecular beam epitaxy (MBE), 2. MnAs, InAs, GaAs(111)B, 3. Magnetic properties, 4. Electrical properties, 5. Lateral spin valve

## 論文審査の結果の要旨

チャージではなくスピンを情報媒体とするスピントロニクス素子は次世代素子の一つとして位置付けられている。大きなRashbaスピン軌道結合を有するナローギャップ半導体チャンネルと強磁性体金属電極との複合構造からなるスピン電界効果トランジスタ(スピンFET)は、半導体ベースの代表的な横型スピントロニクス素子であるが、実現するためには強磁性体金属/半導体界面でのスピン散乱の抑制および逆スピン流の抑制が必要で、したがって強磁性体金属/半導体界面形成法や界面構造が重要となる。

このような背景の下、本論文では、III-V半導体用分子線エピタキシー(MBE)装置で形成可能な室温強磁性体金属である六方晶MnAsに着目し、六方晶との整合性が高いGaAs(111)B基板上に、ナローギャップ半導体チャンネルとなるInAsと逆スピン流抑制のためのトンネル障壁となるGaAsとともにMnAsをin-situで複合化したMnAs/(GaAs)/InAsヘテロ構造をMBE成長し、結晶学的・磁氣的・電氣的に評価した結果を論じている。さらに、MnAs/(GaAs)/InAsヘテロ構造を用いて、電子線リソグラフィー等の微細加工技術により作製した横型スピントロニクス素子について、磁場中での電氣的评价を通じて、界面でのスピン偏極率やチャンネル内のスピン拡散長を評価した結果を論じている。

結晶学的には、GaAsトンネル障壁層成長時の面内格子に関して、3.6 nm以下ではInAsに擬似格子整合し3.6 nmに到達すると瞬時に格子緩和することを見出した。またMnAs成長に関して、従来のMnAs/GaAs(111)Bと同様の成長条件により成長初期に格子緩和をとともなう2次元的な成長していること、結晶軸の関係がMnAs[0001] || InAs/GaAs[111]、MnAs[-2110] || InAs/GaAs[-110]であることを明らかにした。磁氣的には、InAsチャンネル層やGaAsトンネル障壁層を介しても、従来のMnAs/GaAs(111)Bとほぼ同様の室温以上のキュリー温度や磁化の面内等方性を有することを明らかにした。電氣的にはGaAsトンネル障壁層のないMnAs/InAsに関して、オーム性接触であることを実験的に初めて示した。さらに横型スピントロニクス素子に関して、強磁性体電極部分の設計を工夫することにより、スピン注入現象を1.5 Kおよび室温で確認することに成功した。その電極間距離依存性を1次元拡散モデルで解析した結果、スピン偏極率・スピン拡散長がそれぞれ1.5 Kで1.6 %・10  $\mu\text{m}$ 、室温で6.6 %・2.6  $\mu\text{m}$ と見積もられ、室温での偏極率が低温より大きくなる興味深い結果を見出した。

以上、本論文は、GaAs(111)B上のMnAs/III-As複合構造について、その作製技術と横型スピントロニクス素子への応用を実験的に検討したものであり、科学的・技術的にみてスピントロニクス分野の発展に寄与する新規性・有用性のある知見が得られており、学術的に貢献するところが大きい。よって博士(マテリアルサイエンス)の学位論文として十分価値あるものと認めた。